

重力式岸壁の地震時動的挙動に関する 遠心模型実験と数値解析

三村 衛¹・嘉門雅史²・西村正生³・渦岡良介⁴

1 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

2 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

3 正会員 工修 (株)熊谷組 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)

4 正会員 工博 地震防災フロンティア研究センター (〒351-0198 三木市福井字三木山2465-1)

背面に埋立地盤を有する重力式ケーソン岸壁の動的遠心力载荷実験を遠心加速度 30G の下で行い、入力および構造物、地盤上における応答加速度、ケーソン滑動に大きく寄与すると思われる地盤と構造物の境界における間隙水圧と土圧、さらに地震外力によって生じるケーソンの変位を計測することによって、地震による重力式ケーソン岸壁の変状機構の解明とそれに寄与する要因について詳細に検討した。実験により、地震外力、置換砂地盤の支持力低下などの要因によって岸壁が変状することが確かめられた。また遠心力载荷実験をモデルとして動的有限要素解析を実施した。その結果、解析結果は遠心力载荷実験における応答加速度特性、過剰間隙水圧の発生活動機構、動的変形特性をほぼ妥当に評価しうることがわかった。

Key Words : centrifuge test, liquefaction, lateral movement, acceleration, FEM

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震によって神戸港をはじめとする阪神間の港湾施設は甚大な被害を被ったが、その多くは軟弱沖積粘土地盤を床掘置換した砂層の上に捨石マウンドを敷設し、コンクリート製のケーソンを据え付けて背面を埋め立てるという構造を有するいわゆる重力式ケーソン岸壁であった。

重力式ケーソン岸壁被災の共通的なパターンは、前面に傾斜しながら海側に大きく滑動するというものであり、地震直後からの調査・研究によって、被災要因として、①地震による慣性力、②背面地盤の液化化による動土圧の増大、③置換砂地盤の変形や支持力低下などが指摘された。

重力式ケーソン岸壁の被災メカニズムの解明に関しては、特に兵庫県南部地震を受けて、数値解析によるもの、実験的なアプローチとしては1G場におけるものと遠心力载荷装置を用いたものなどが精力的に行われており、いずれも前述した①～③の被災要因が確認され、重力式ケーソンの動的変形について興味深い知見が報告されている。

こうした研究成果を受けて本報告では、背面と底面に水圧計と土圧計を埋め込んだケーソン模型を用いた

遠心力载荷実験を行う。まず、入力加速度、応答加速度を4カ所で測定することによって、過剰間隙水圧の発生によって引き起こされる有効応力および支持力の低下に伴う加速度変動についても調べる。次に、ケーソンと液化化発生が予想される背面埋立地盤との境界、およびケーソンと地震外力による支持力低下が懸念される捨石マウンドとの境界における動的応力変化に着目し、これら地盤・構造物間の動的応力変動がケーソン岸壁の変状にどのように寄与するのかについて検討する。こうした知見に基づいて地震力を受ける重力式ケーソン岸壁の滑動メカニズムについて実験的に検討する。また同時に、遠心力载荷実験をモデルとした有限要素法による数値解析を実施する。解析に必要なパラメータを模型実験で使用する砂質材料を用いた室内実験と遠心力载荷実験から得られる情報に基づいて合理的に設定し、応答加速度、地盤内応力、変位の各成分ごとに実験値と比較することにより、実験で得られる結果の妥当性を検証する。

2. 遠心力载荷試験の概要

本研究では京都大学防災研究所の遠心力载荷実験装

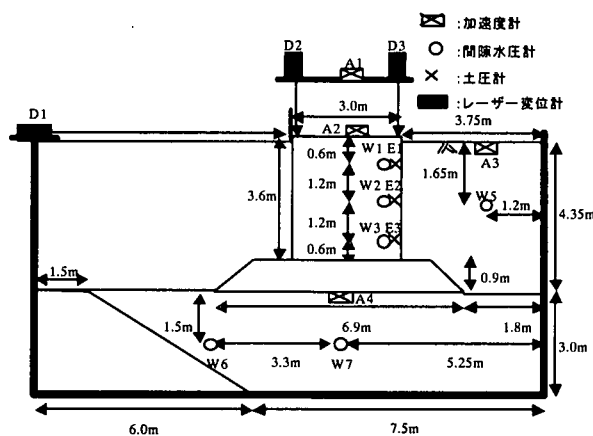


図-1 模型断面図及び計測位置(実物換算値)¹⁾

置を用いて実験を行った。模型に作用させる遠心加速度は30Gとし、electro-hydraulic型のアクチュエータを用いた油圧式振動台によって回転方向と同じ方向に一次元的に加振させることによって地震外力を与えた。模型断面及び計測位置を図-1に示す。置換砂地盤、背面埋立地盤は珪砂7号を用いて作製した。また間隙流体は振動時の透水に関する相似則を考慮して、セルローズ系水溶液であるメトロゾスを水の粘性の30倍に調整して使用した¹⁾。

置換砂地盤、背面埋立地盤は相対密度が56%となるように液中落下法で作製した。また、置換砂前面の海成粘土がケーソンの動的変形に及ぼす影響を考慮して、粘土部分には剛体を用いず、自立性と変形性を併せ持つ材料として木綿豆腐でモデル化した。試験で用いた土槽はチタン製で内部寸法が高さ30cm、幅45cm、奥行き15cmである。ケーソン模型は高さ12cm、幅10cmの縦横比6:5のものである。本実験では全て30Gの遠心加速度で行っており、このケーソン模型は実物換算で高さ3.6m、幅3.0mのケーソンに相当し、その密度(2.3t/m^3)に調整している。また、ケーソン模型には非接触レーザー変位計によって水平、鉛直方向の変位を計測するために、ケーソン上面にレーザー光を反射させる反射板を取り付けている。

土槽には入力加速度を計測するために、また置換砂地盤、背面埋立地盤表面部にはそれぞれ応答加速度を計測するために加速度計を設置した。さらに、ケーソン上部にも加速度計を取り付け、ケーソン天端の応答加速度を計測した。間隙水圧計は置換砂地盤中に2カ所、背面地盤中に1カ所設置することにより地盤の挙動を調べた。さらにケーソン模型の背面に3点、底面に1点の間隙水圧計が取り付けられており、背面埋立地盤および捨石マウンドとケーソン境界部の間隙水圧と土圧を計測した。

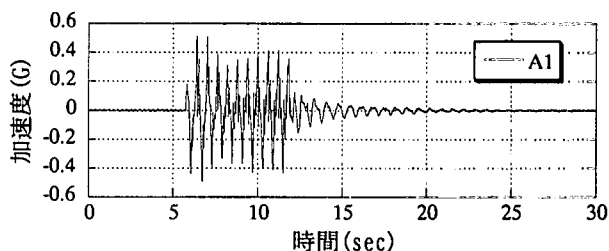


図-2 振動台加速度の時刻歴

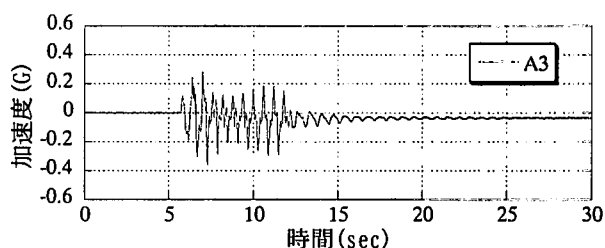


図-3 埋立地盤表面の応答加速度の時刻歴

3. 試験結果と考察

図-2に入力地震波を示す。入力波は周波数が1.67Hzの正弦波で、10波载荷した。最大加速度は約0.5Gを瞬間的には記録しているが、平均的には0.4G程度となっていることがわかる。これに対してケーソン背面地盤の加速度時刻歴(図-3)では大きな減衰が認められ、背面埋立地盤で液状化発生に伴う地盤の軟化が生じていることがわかる。

ケーソン変位の時刻歴を図-4に示す。ケーソンの水平変位(D1)は海側を正、鉛直変位(D2, D3)は沈下を正としている。ケーソンの変形は主として主振動中に生じており、振動载荷終了後は変形が完全に止まっていることがわかる。またケーソンの水平変位は海側に約400mm、ケーソンの沈下量は前面海側(D2)で約150mm、背面埋立地盤側(D3)で約50mmとなっており、ケーソンは海側に約1.9度傾く変形モードを示している。

ケーソン背面の間隙水圧(W2)の時刻歴を図-5に、背面埋立地盤の間隙水圧(W5)の時刻歴を図-6に示す。両ポイントともに有効上載圧は16kPaである。ケーソン背面(W2)においては地震外力による間隙水圧の発生量は8kPaとなっており、液状化は発生しなかった。これに対して、背面埋立地盤(W5)においては完全に液状化していることがわかる。ケーソン背面において完全液状化しなかった理由としては、地震動によってケーソンが海側に変形して、ケーソンと埋立地盤の境界では引張変形による体積膨張モードになり、その結果過剰間隙水圧の上昇が抑制されたためと考えられる。一方埋立地盤内ではこうした局所的な影響を受けない条件にあり、容易に液状化に至ったものと考えられる。

表-1 解析に用いた土質定数⁴⁾

	海成粘土	置換砂地盤 背面埋立地盤	捨石 マウンド
湿潤密度 $\hat{\rho}(\text{t/m}^3)$	1.75	1.84	2.05
透水係数 $k(\text{m/s})$	1.0E-8	7.2E-5	2.0E-3
初期間隙比 e_0	1.75	0.96	0.483
圧縮指数 $\hat{e}$	0.39	0.00708	0.00356
膨潤指数 $\hat{e}$	0.05	0.00299	0.00149
せん断係数比 $G_0/\hat{\sigma}_{m0}$	472	1.5E+3	2.18E+3
変相応力比 M_m	0.89	0.769	0.769
破壊応力比 M_f	0.98	0.992	1.068

ついて検証する必要がある。そこで本節では、有限要素法を用いて前節で議論した遠心力載荷実験を対象として解析し、実測加速度、応力、変形の各値との比較を通して実験結果の妥当性を検証する。本報告では解析コード LIQCA を用いた。LIQCA は Biot の二相混合体理論に基づいた土-水連成の動的な支配方程式に、砂及び粘土の繰返し弾塑性モデルを構成式²⁾として組み込んだ液状化解析手法³⁾である。構成式とコードの詳細については文献を参照されたい。

解析に際して遠心力載荷実験で用いた材料の土質定数⁴⁾を表-1 に示す。砂と捨石マウンドについては可能な限り室内試験を実施してパラメータの値を決定した。液状化に関するパラメータは実験によって求めた液状化強度曲線を再現できる要素シミュレーションから決定した。海成粘土については木綿豆腐の力学試験が困難であったため、既往の研究から堆積環境の類似した沖積粘土の値を用いた。

実施した解析が実験の動的環境を再現していることは結果の比較を行うにあたって最も重要な問題となる。ここではケーソンの変形という現象に最も寄与が大きいと考えられる周波数帯以外の波をフィルタリングをかけて取り除き、解析と実測の加速度波形の比較を行った。

図-7 にケーソン背面埋立地盤上で計測された応答加速度と同じポイントで数値解析によって得られた加速度時刻歴の比較を示す。既に述べたように、フィルタリングによって周期 1sec 未満と 2sec 以上の部分をカットし、構造物の変形挙動に強く寄与すると考えられる 1~2sec の周波数帯の加速度に限定して比較している。解析結果はわずかに位相にずれがあるものの、測定された加速度波形をほぼ再現していることがわかる。

ケーソン背面の過剰間隙水圧(W2)及び背面埋立地盤の過剰間隙水圧(W5)の時刻歴を図-8、9 に示す。図-5 に示した試験結果と比べて W2 は大きめに過剰間隙水圧が発生している。これは、遠心力載荷試験においては間隙水圧計 W2 はケーソンの背面に埋め込まれたものであるため、ケーソン背面境界における過剰間隙水圧を計測することになるのに対し、解析結果はケーソ

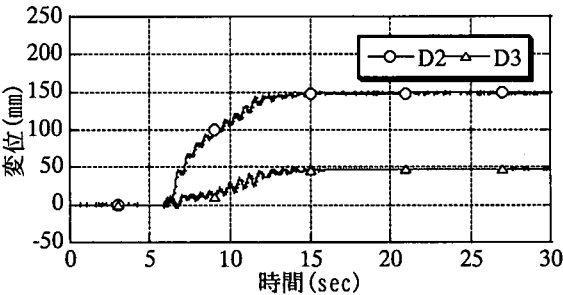
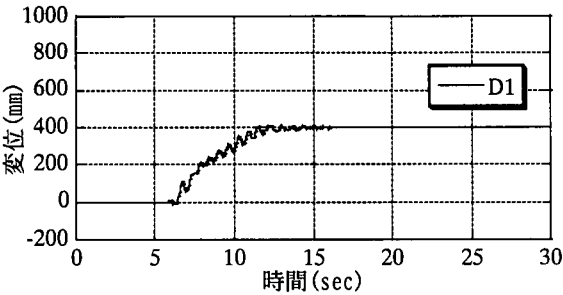


図-4 ケーソン変位の時刻歴

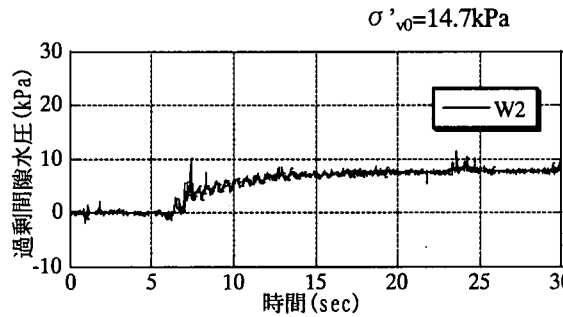


図-5 ケーソン背面中央における間隙水圧の時刻歴

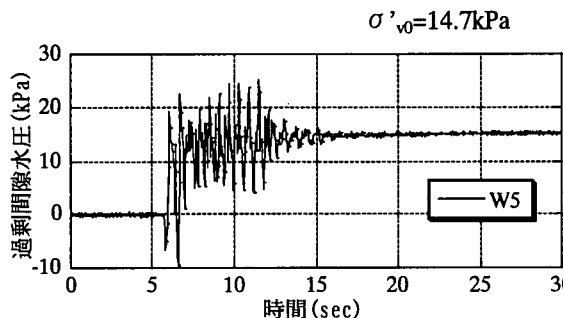


図-6 背面埋立地盤中央における間隙水圧の時刻歴

4. 数値解析による検討

前節で示した遠心力載荷実験では、地盤・構造物各点における加速度、変位、間隙水圧、土圧などを測定した。ケーソンの動的変形挙動は実験の境界条件の下でこれらの複合的な相互作用の結果として現れたものであるが、得られた結果が妥当なものであるか否かに

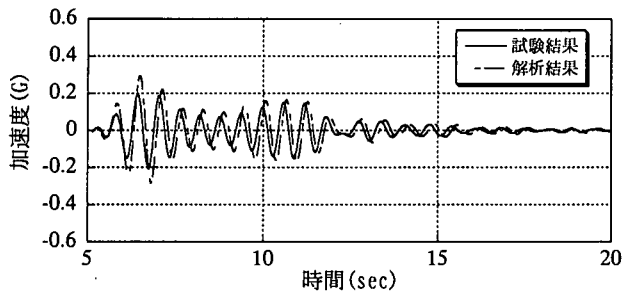


図-7 フィルタリングされた埋立地盤上 (A3) における応答加速度波形の比較

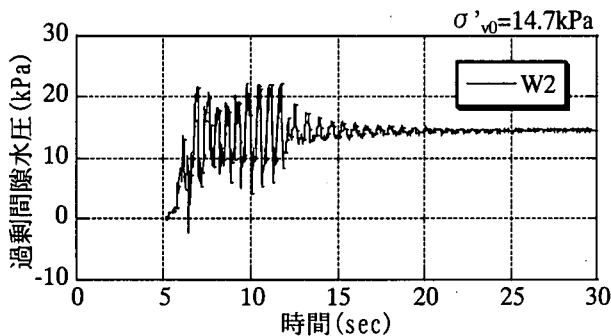


図-8 ケーソン背面地盤における間隙水圧の解析結果

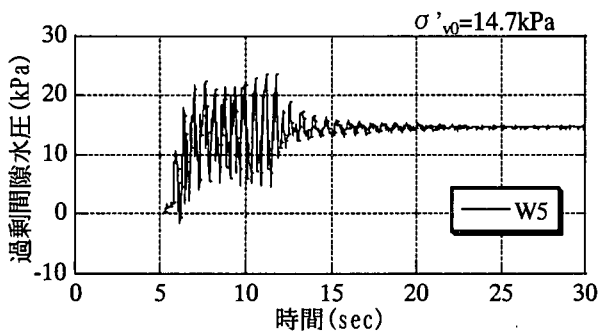


図-9 埋立地盤における間隙水圧の解析結果

ン背面に隣接する土要素の重心における過剰間隙水圧を出力しているためと考えられる。また図-9の背面埋立地盤(W5)については、図-6に示す試験結果とほぼ一致しており、完全液状化に至っているのが確認できる。

ケーソン変位の時刻歴の解析結果を図-10に示す。解析におけるケーソンの水平変位(D1)は850mmとなり、試験結果(図-4)と比べて水平変位を過大に評価していた。また、ケーソンの鉛直変位(D2, D3)についても解析の方がやや大きめに発生している。一方、変形の発生モードは振動中に徐々に増大し、振動停止と同時に変形が止まるという実験結果と一致したものとなっている。また最終的なケーソンの傾きは海側に約 1.7° となっており、実験結果(1.9°)と調和的であった。

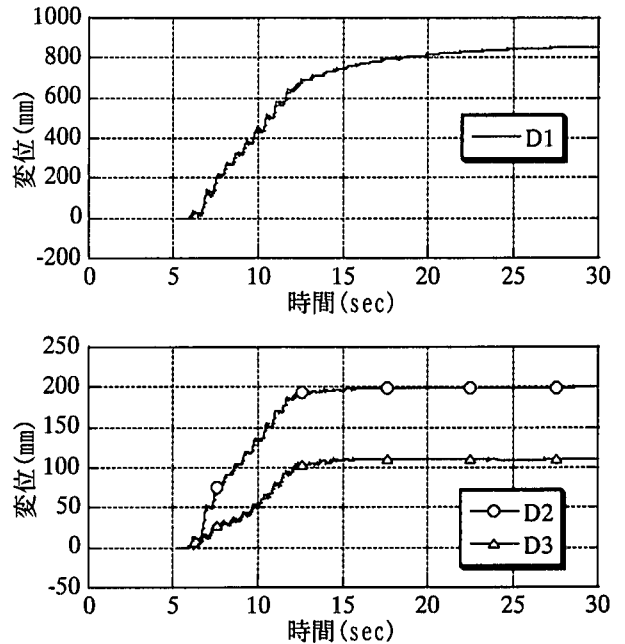


図-10 数値解析によるケーソン変位の時刻歴

5. おわりに

重力式岸壁の地震時動的挙動を遠心力载荷実験と数値解析によって検討した。遠心力载荷実験から、ケーソンは振動载荷中に主として変形することがわかった。また、背面埋立地盤は完全液状化に至ったが、ケーソンと埋立地盤境界付近では両者の相互作用によって過剰間隙水圧の上昇が抑制される現象が実験で確認された。ケーソンは実際の被災パターンと同様、海側に傾くモードで変形した。有限要素法による数値解析によって実験結果のシミュレーションを行った。地盤の応答加速度、過剰間隙水圧の発生と消散過程、ならびにケーソンの変形モードについては、解析値はほぼ実験結果を再現しうるが、変位の絶対量については過大な値を与えた。実験における構造物と壁面の摩擦の影響、解析における砂の軟化機構を制御するパラメータの設定などが今後の検討課題である。

6. 参考文献

- 1) 嘉門ら, 第36回地盤工学研究発表会, 2001.
- 2) Oka et al., Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680., 1999.
- 3) Oka, et al. Applied Scientific Research, Vol. 52, pp. 209-245, 1994.
- 4) 西村正生, 京都大学修士論文, 2001.